

基于目标威胁评估的组网雷达干扰的功率分配

李一鸣, 吴军, 彭芳, 张帅

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

摘要 随着电子战中雷达网的“四抗”能力不断提升, 干扰机的功率如何进行分配将成为战机突防的关键。针对此问题, 提出了基于目标威胁评估的协同电子干扰的功率分配方法。建立了一种组网雷达的威胁评估模型, 该模型通过规范化的基本方法, 计算出雷达各属性对应的威胁评估值, 得到雷达威胁评估值规范化矩阵。通过计算其与理想解的距离得到相对贴近度, 进而计算出各成员综合威胁程度。根据其威胁程度的比重, 在干扰功率有限的前提下, 进行较为合理的分配。最后经过仿真验证, 证明了该方法的可行性。结果表明: 选取合适的组网雷达待评估属性, 利用该方法可以得到干扰功率分配的初步规划, 对该领域的后续研究具有一定的参考价值。

关键词 雷达网; 协同电子干扰; 威胁评估; 功率分配

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.02.003

中图分类号 TN972 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)02-0013-05

A Power Allocation Based on Threat Evaluation of Radar Network Jamming

LI Yiming, WU Jun, PENG Fang, ZHANG Shuai

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University,
Xi'an 710038, China)

Abstract: With the growth of four countering capability of the radar network in electronic warfare, the allocation power of jammer becomes a key to the aircraft penetration. For this reason, a method of power allocation based on threat evaluation of collaborative electronic jamming is given. A kind of the radar network threat assessment model is established, and the basic methods of the model through standardization calculate the radar threat assessment value of each attribute corresponds to get radar threat assessment value standardization matrix. The paper obtains a relative degree through calculation of the distance and an ideal solution, and comprehensive threat level calculated for each member. A reasonable power distribution can be performed through the threat level proportion of the radar network on the premise of limited jamming power. Finally, the simulation shows that the method is feasible. The results show that in selecting appropriate radar network for evaluating parameters, interference power allocation can be achieved by using the method, and has a certain reference value for further research in this field.

Key words: radar network; cooperative electronic jamming; threat evaluation; power allocation

收稿日期: 2016-06-27

基金项目: 航空科学基金(20145596025)

作者简介: 李一鸣(1992—), 男, 辽宁鞍山人, 硕士生, 主要从事电子与信息对抗研究. E-mail: 523170082@qq.com

引用格式: 李一鸣, 吴军, 彭芳, 等. 基于目标威胁评估的组网雷达干扰的功率分配[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(2): 13-18. LI Yiming, WU Jun, PENG Fang, et al. A Power Allocation Based on Threat Evaluation of Radar Network Jamming[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(2): 13-18.

随着电子战样式不断的增加,电子战技术不断的完善,飞机编队的协同作战已经成为主要的作战形式,如何为战斗机的突防提供有效的安全保障成为战场决策中重要的问题。在飞机编队协同作战的突防决策中,干扰机必须利用有限的干扰资源,合理地对方雷达网进行干扰,最大限度地保全己方战斗机。由此可见,合理的对方干扰机的干扰功率进行分配将成为战机突防的关键。

飞机编队协同作战将成为未来的主流方向,文献[1~3]对国内外相关的领域已经开始对协同作战方法进行了一系列的研究。文献[4]通过对飞机编队探测范围的探究,实现协同作战的规划。文献[6~9]通过不同的建模方法,对目标的威胁系数进行了计算。但关于协同作战的干扰战术选择、干扰功率分配等方面仍有些问题等待解决。本文针对协同作战中干扰机功率的分配问题进行研究,通过对雷达网各组成部分的威胁评估模型的建立,从而计算出其综合威胁程度,以其相关比重作为依据对方干扰功率进行合理的分配。为协同作战中,干扰机功率分配决策提供了新的方法。最后通过仿真,可以证明该方法可以较准确地进行功率分配。

1 干扰功率分配问题描述

在电子战协同作战中,干扰机的功率分配就是在自身有限的功率范围内,找到一种对地面雷达网各组成部分较为合理的干扰功率分配的方式,来帮助干扰机在较短的时间内做出正确的决策。在现代复杂的电磁战场环境中,电子战飞机协同突击完成预定作战任务,提高其战场生存力变得越来越重要。基于此目的,通常需要考虑雷达网各组成部分的待评估威胁参数,建立威胁评估模型,进而得出其综合威胁程度来进行干扰机的功率分配。

1.1 雷达组网的威胁评估过程分析

协同作战中,飞机编队中干扰机对地面雷达组网的威胁评估,是基于编队的统一指挥,编队中的干扰机共享信息来进行协同决策,来判断各雷达组网对我方战机威胁程度的过程。雷达组网与飞机编队的位置关系见图1,根据战斗机执行任务时,所处的位置得到与各雷达间的距离,即 L_1, L_2, L_3, L_4 。在接近敌方雷达组网的过程中,编队干扰机通过对敌方雷达组网成员数据信息的采集,及时进行信息的交换与整合。决策者在接收到信息之后,结合数据信息对整个雷达组网的态势进行简单的分析,综合雷达自身属性、自然环境等多方面因素来进行功率

分配的决策。

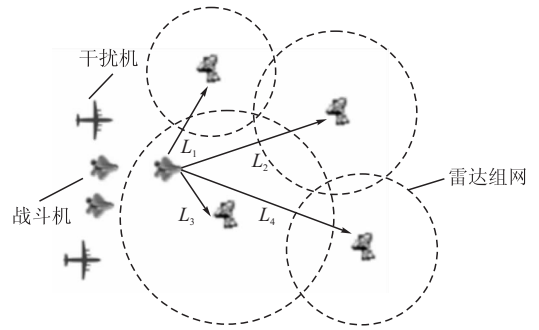


图1 雷达组网与飞机编队的位置关系

Fig. 1 The relationship between radar network and aircraft formation

飞机编队协同作战的雷达组网威胁评估过程见图2,评估过程是从各个战机的角度过渡到编队的角度进行雷达组网威胁评估。利用飞机传感器对地面雷达组网成员数据的采集,通过飞机编队共享,经过数据处理,确定雷达组网成员对编队整体的威胁程度。

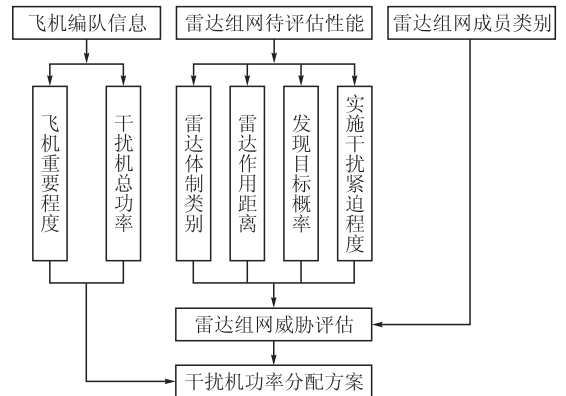


图2 雷达组网威胁评估过程

Fig. 2 The process of threat evaluation of radar network

1.2 雷达组网威胁评估模型

1.2.1 威胁评估方法

为防止飞机对雷达组网的威胁程度评估的标准过于单一,本文使用雷达组网的多属性参数供飞机编队进行参考,进行威胁程度的评估考量。现在假设待评估的地面雷达组网由 m 个雷达组成,记作 $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$, $B_i \in B, i \in [1, m]$ 。地面雷达组网的待评价属性有 n 个,记为 $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$, $K_j \in K, j \in [1, n]$,运用层次分析法^[8]可以确定每个待评价属性所对应的权重,即 K_j 所对应的权重为 ω_j ,其中 $\omega_j \in [0, 1]$, $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ 。飞机编队发现雷达组网后,根据机载雷达截获的信号,可以对雷达组网的探测距离、覆盖范围等属性进行综合分析,得到雷达组网中的雷达 B_i 关于评价属性 K_j 的威胁评

估值 x_i^j , 将所有的威胁评估值进行汇总, 可以得到多属性威胁评估值矩阵, 记作 $\mathbf{X} = (x_i^j)_{m \times n}$ 。根据矩阵中的数值大小, 可以对雷达组网成员对编队的威胁程度进行排序。

雷达的不同属性之间的评价标准不相同会对雷达的威胁程度估计产生影响, 需要对多属性威胁评估值矩阵进行标准化处理, 再利用综合评价对雷达威胁程度进行评价。常用的综合评价方法有 CIM 法、FCE 法、TOPSIS 法等, 本文采用 TOPSIS 法进行求解。多属性规范化公式如下:

$$y_i^j = x_i^j / \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i^j)^2} \quad (1)$$

$$z_i^j = (1/x_i^j) / \sqrt{\sum_{i=1}^m (1/x_i^j)^2} \quad (2)$$

式(1)为效益型属性规范化公式, 式(2)为成本型属性规范化公式。

根据 TOPSIS 法的基本思想, 以效益型属性为例进行求解, 通过计算可以得到威胁评估值规范化矩阵 $\mathbf{Y} = (y_i^j)_{m \times n}$ 。现设有 $S_j^+ = \max_i (y_i^j)$, $S_j^- = \min_i (y_i^j)$, 称 $\mathbf{I}_j^+ = \{S_1^+, S_2^+, \dots, S_n^+\}$ 为理想解, 是地面雷达组网各属性的最大威胁评估值的集合, $\mathbf{I}_j^- = \{S_1^-, S_2^-, \dots, S_n^-\}$ 为负理想解, 是地面雷达组网各属性的最小威胁评估值的集合。由此可知, 待评估的地面雷达 B_i 各属性威胁评估值与理想解 \mathbf{I}_j^+ 越接近, 该雷达对飞机编队的威胁程度越大; 待评估的地面雷达 B_i 各属性威胁评估值与理想解 \mathbf{I}_j^- 越接近, 该雷达对飞机编队的威胁程度越小。为了合理客观地评价雷达威胁程度大小, 文中用相对贴适度来判断雷达 B_i 与理想解之间的差距。设雷达 B_i 的各属性威胁评估值 \mathbf{A}_i , 分别计算 \mathbf{A}_i 与 \mathbf{I}_j^+ 、 \mathbf{I}_j^- 之间的偏差, 即:

$$D_i(\mathbf{A}_i, \mathbf{I}_j^+) = \sqrt{\sum_{j=1}^n [\omega_j (y_i^j - S_j^+)]^2} \quad (3)$$

$$D_i(\mathbf{A}_i, \mathbf{I}_j^-) = \sqrt{\sum_{j=1}^n [\omega_j (y_i^j - S_j^-)]^2} \quad (4)$$

可以求得待评估雷达 \mathbf{A}_i 的各属性威胁评估值与理想解 \mathbf{I}_j^+ 的相对贴适度, 即:

$$\alpha_i = D_i(\mathbf{A}_i, \mathbf{I}_j^-) / [D_i(\mathbf{A}_i, \mathbf{I}_j^+) + D_i(\mathbf{A}_i, \mathbf{I}_j^-)] \quad (5)$$

根据 α_i 值的大小可判断雷达 \mathbf{A}_i 的威胁程度, 即 α_i 的值越大, 其对应的雷达 \mathbf{A}_i 对编队的威胁就越大。

1.2.2 雷达组网威胁评估模型

在 1.2.1 节中所考虑的是雷达组网对飞机编队中单架飞机的威胁程度, 对于编队执行任务的过程中, 每架飞机所承担的任务有所区别, 其所对应的重要性会有所区分。对于飞机编队而言, 就是要综合

考虑雷达组网的各属性威胁评估值以及自身的重要性, 对雷达组网各组成部分进行客观、合理地评估, 对其综合威胁程度进行比较, 为下一步的功率分配做准备。

现在假设飞机编队由 q 架飞机组成, 每架飞机对应的编号记作 $Q, Q \in [1, q]$ 。设飞机 $t, t \in Q$, 在飞机编队中所对应的重要程度为 $r(t), r(t) \in [0, 1], \sum_{t=1}^q r(t) = 1$; 在飞机编队执行任务的过程中按照 1.2.1 节中所讲述的方法对地面雷达组网 $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$ 进行威胁程度的计算, 将雷达组网对每架飞机的威胁评估值进行记录, 从而得到对应的相对贴适度 α_i , 将其汇总成为相对贴适度矩阵, 记作 $(\alpha_i(t))_{m \times n}$ 。

根据相对贴适度矩阵中的数据, 结合编队执行任务时每架飞机的重要程度, 可以计算出雷达组网的成员对编队的每架飞机的威胁程度, 进而可以得到雷达组网成员对编队的综合威胁评估值 R_i , 即:

$$R_i = \sum_{t=1}^q r(t) \alpha_i(t) \quad (6)$$

根据所求得的综合威胁评估值 R_i 就可以得到雷达组网各成员对飞机编队的威胁程度, 雷达所对应的 R_i 值越大, 其对飞机编队的威胁就越大, 探测到飞机编队的概率就越高。在飞机编队执行任务时, 会影响编队的整体作战效能。

2 基于雷达网威胁评估的功率分配

2.1 雷达网成员综合威胁评估值权重计算

飞机编队干扰机功率分配的主要任务是在编队执行任务时, 将有限的干扰功率按照各雷达组网的威胁评估值之间的比例关系, 进行合理的分配, 使得在实施干扰之后编队可以获得较大的作战优势。

由 1.2.2 节中的式(6)可以得到雷达组网成员对编队的综合威胁评估值, 进而通过计算可以得到成员威胁评估值所占的比重, 即:

$$\tau_i = R_i / R_{\text{sum}} \quad (7)$$

式中: $R_{\text{sum}} = R_1 + R_2 + \dots + R_m$ 。

根据雷达组网威胁评估模型, 可以将雷达组网成员各威胁参量进行综合考量, 得到雷达组网成员综合威胁评估值, 结合飞机编队干扰机的总干扰功率, 可以得到综合威胁评估值和总干扰功率之间的关系, 从而可以根据综合威胁估计值进行功率的分配。

2.2 协同电子干扰功率分配步骤

飞机编队中干扰机功率分配主要步骤如下:

Step1 对雷达网成员的威胁评估值进行采集, 记作 $\mathbf{X} = (x_i^j)_{m \times n}$ 。

Step2 对 Step1 中的矩阵进行规范化处理,得到 $\mathbf{Y}=(y_{ij}^i)_{m \times n}$ 。进而根据式(3)~(5)可以求得雷达网的相对贴进度 α_i 。

Step3 根据 $R_i = \sum_{t=1}^q r(t)\alpha_i(t)$ 可求得雷达网成员对飞机编队的综合威胁程度。通过 $\tau_i = R_i/R_{\text{sum}}$ 得到其威胁评估值所占的比重。

Step4 干扰机进行功率分配时,假设总干扰功率为 P_{sum} , P_{sum} 为有限常数。根据 Step3 中所求得威胁评估值的比重 τ_i , 可以相应求得干扰机需对其分配的功率。干扰机干扰功率分配的表达式即:

$$P_i = P_{\text{sum}} \tau_i \quad (8)$$

式中: P_i 为干扰机执行任务时,对雷达组网成员 B_i 所分配的功率。

3 仿真分析

为了验证本文计算方法的合理性,进行了大量的实例验证。下面以协同作战飞机编队干扰机支援下的突防任务为例,对功率分配的结果进行仿真分析。

假设:某飞机编队由 3 架战斗机组成,分别为飞机 1,飞机 2,飞机 3。每架战斗机的重要程度分别为 $r(1)=0.25, r(2)=0.4, r(3)=0.35$; 飞机编队的干扰机干扰总功率 P_{sum} 为 150 kW; 地面雷达组网的体制类别有 4 个, $B = \{B_1, B_2, B_3, B_4\} = \{\text{相控阵雷达, 合成孔径雷达, 多普勒雷达, 单脉冲雷达}\}$; 地面雷达组网的威胁评价属性有 3 个, $K = \{K_1, K_2, K_3\} = \{\text{雷达作用距离, 发现目标概率, 实施干扰紧迫程度}\}$, 其中 K_1, K_2 属于效益型属性,应采用式(1)计算;而 K_3 属于成本型属性,应采用式(2)计算。 K_1, K_2, K_3 所对应的权重分别为 $\omega_1=0.3, \omega_2=0.3, \omega_3=0.4$ 。现在,飞机编队中飞机 1 进行综合分析估计后,得到雷达组网中每个成员的待评价属性值见表 1。

表 1 雷达组网成员的待评价属性值

Tab. 1 Threat attribute values for the members of the radar network

雷达体制类别	评价属性		
	K_1/km	K_2	K_3/s
B_1	400	0.72	210
B_2	250	0.35	320
B_3	310	0.80	170
B_4	200	0.70	260

根据表 1 中的评价属性的数据,结合多属性规范化公式(1)和(2),可以得到雷达组网各成员的规范化评价属性值,见表 2。

表 2 规范化评价属性值

Tab. 2 Normalized evaluation attribute values

雷达体制类别	评价属性		
	K_1/km	K_2	K_3/s
B_1	0.668 0	0.541 0	0.526 4
B_2	0.417 5	0.263 0	0.345 4
B_3	0.517 7	0.601 2	0.650 2
B_4	0.334 0	0.526 0	0.425 2

根据表 2 的数据可以分别求出理想解为 $\mathbf{I}^+ = \{0.668 0, 0.601 2, 0.650 2\}$, 负理想解为 $\mathbf{I}^- = \{0.334 0, 0.263 0, 0.345 4\}$ 。由式(3)、(4)可以求得目标各属性威胁评估值 $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3, \mathbf{A}_4$ 到 $\mathbf{I}_j^+, \mathbf{I}_j^-$ 的距离,即:

$$D_1(\mathbf{A}_1, \mathbf{I}_j^+) = 0.052 7$$

$$D_1(\mathbf{A}_1, \mathbf{I}_j^-) = 0.149 1$$

$$D_2(\mathbf{A}_2, \mathbf{I}_j^+) = 0.175 5$$

$$D_2(\mathbf{A}_2, \mathbf{I}_j^-) = 0.025 0$$

$$D_3(\mathbf{A}_3, \mathbf{I}_j^+) = 0.045 1$$

$$D_3(\mathbf{A}_3, \mathbf{I}_j^-) = 0.167 9$$

$$D_4(\mathbf{A}_4, \mathbf{I}_j^+) = 0.136 6$$

$$D_4(\mathbf{A}_4, \mathbf{I}_j^-) = 0.085 1$$

根据式(5)可求得雷达组网的相对贴进度,即:

$$\alpha_1 = 0.738 8, \alpha_2 = 0.124 9, \alpha_3 = 0.788 3, \alpha_4 = 0.383 9。$$

再按照上述的计算过程分别对飞机 2、飞机 3 的相对贴进度进行求解,得到 $(\alpha_i(t))_{3 \times 4}$, 即:

$$(\alpha_i(t))_{3 \times 4} = \begin{bmatrix} 0.738 8 & 0.124 9 & 0.788 3 & 0.383 9 \\ 0.512 4 & 0.362 5 & 0.499 6 & 0.866 3 \\ 0.349 6 & 0.281 7 & 0.569 8 & 0.543 4 \end{bmatrix}$$

根据式(6)可以求得雷达组网所有成员对飞机编队的综合威胁程度,而后通过式(7)、(8)可以求得飞机编队在执行任务时,对雷达组网各成员实施干扰的功率分配方案,见表 3。

$$R_1 = 0.510 9, R_2 = 0.274 8, R_3 = 0.596 3, R_4 = 0.632 7。$$

表 3 功率分配方案

Tab. 3 The scheme of power allocation

雷达体制类别	仿真结果		
	R_i	τ_i	P_i/kW
B_1	0.510 9	25.36%	38.04
B_2	0.274 8	13.64%	20.46
B_3	0.596 3	29.60%	44.40
B_4	0.632 7	31.40%	47.10

从上述仿真结果可以看出,本方案可以根据雷达组网各成员的类别、作战时的特征属性等特点,对其威胁评估值进行计算,而后结合飞机编队执行任务时各飞机的重要程度、自身的总功率限制等条件,得到最终的分配结果,即 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 。该方案在飞机编队执行任务时,根据战场态势可以较为全面、准确的对雷达组网各成员的属性值进行汇总,通过本文的算法得到综合威胁评估值,进而快速的得到合理的功率分配结果,为战机执行任务时的安全性提供重要的保障。

4 结语

随着现代战争形式的多样化,飞机编队协同完成突防等任务已经成为一种重要的模式。目前,飞机编队协同作战的问题探索还处在发展阶段。本文对飞机编队中的干扰机干扰功率分配问题进行了深入的研究,通过计算雷达组网各成员对飞机编队的威胁程度,得到其对应的威胁评估值比重,进而建立了基于雷达组网威胁评估值的干扰机干扰功率分配模型。通过此方法,可以对干扰机干扰功率分配进行优化,得到较好的分配方案。通过仿真计算验证了算法的准确性,本文的结论可以为协同电子战中编队干扰机功率的分配提供可靠的依据。

参考文献(References):

- [1] 李波,高晓光. 编队空战中协同电子干扰的功率分配[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(7):1298-1300.
LI B,GAO X G. Algorithm of Power Allocation For Cooperative Electronic Jamming in Air Combat of Formation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008,30(7):1298-1300. (in Chinese)
- [2] 史小斌,顾红,苏卫民,等. 地面侦察雷达目标威胁度评估方法研究[J]. 兵工学报,2015,36(6):1128-1135.
SHI X B, GU H, SU W M, et al. Study of Target Threat Assessment for Ground Surveillance Radar [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(6): 1128-1135. (in Chinese)
- [3] 范春彦,韩晓明,王献锋. 基于最大隶属度的目标威胁评估与排序法[J]. 系统工程与电子技术,2003,25(1):47-48.
FAN C Y, HAN X M, WANG X F. Target Threat Evaluating and Sequencing Method on the Maximum Degree of Membership[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(1): 47-48. (in Chinese)
- [4] 冉华明,周锐,董卓宁,等. 空战中协同干扰、探测、攻击任务分配[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(5):911-918.
RAN H M, ZHOU R, DONG Z N, et al. Cooperative Jamming-detecting-attacking Task Allocation in Air Combat[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(5): 911-918. (in Chinese)
- [5] 付昭旺,于雷,寇英信,等. 混合编队协同空战电子支援干扰功率分配方法[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(6):1171-1175. (in Chinese)
FU Z W, YU L, KOU Y X, et al. Electronic Jamming Power Assignment Method In Cooperative Air Combat of Mixed Formation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(6): 1171-1175. (in Chinese)
- [6] 王新增,李俊山,慈林林,等. 雷达网对侦察无人机突防的威胁评估模型[J]. 火力与指挥控制,2011,36(8):32-35.
WANG X Z, LI J S, CI L L, et al. Threat Evaluation Model of Radar Network Against Reconnaissance UAV Penetration [J]. Fire Control and Command Control, 2011, 36(8): 32-35. (in Chinese)
- [7] 杨士英,陈辉,花良发. 突防过程中组网雷达辐射源威胁等级评估[J]. 雷达科学与技术,2013,11(4):341-344.
YANG S Y, CHEN H, HUA L F. Threat Degree Assessment of Radar Emitters for Netted Radar System in Penetrating Process[J]. Radar Science and technology, 2013, 11(4): 341-344. (in Chinese)
- [8] 王玮,张玉芝. 模糊 AHP 的权重向量求解方法研究[J]. 控制与决策,2006,21(1):184-188.
WANG W, ZHANG Y Z. Research on Weight Vector Resolution Method of Fuzzy AHP [J]. Control and Decision, 2006, 21(1): 184-188. (in Chinese)
- [9] OKELLO N, THORNS G. Threat Assessment Using Bayesian Networks[C]//Proceedings of 6th International Conference of Information Fusion. Cairns, Queensland, Australia; IEEE, 2003: 1102-1109.
- [10] 陈雅雯,夏伟杰,吴连慧,等. 基于 AHP 模糊综合评价法的辐射源威胁等级评估[J]. 现代电子技术,2014,37(19):21-24.
CHEN Y W, XIA W J, WU L H, et al. Threat Degree Assessment of Radar Radiation Source Based on AHP-Fuzzy Comprehensive Evaluation Method [J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(19): 21-24. (in Chinese)
- [11] MARK M J. Cooperative Electronic Arrack Using Unmanned Air Vehicles[C]// Proceedings of the American Control Conference. 2005:3339-3346.
- [12] 程越,周中良,王恺,等. 基于综合效能优选的空战攻防策略[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2016,17(5):14-19.

- Modern Radar, 2014, 36(3):11-15. (in Chinese)
- [13] LAMBOUR R, MORGAN T, RAJAN N. Assessment of Orbital Debris Size Estimation from Radar Cross Section Measurements[J]. Advances in Space Research, 2004, 34(5):1013-1020.
- [14] 何松华, 张长沙, 张军. 步进调频雷达目标速度的实时不模糊估计方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(5):59-63.
- HE S H, ZHANG C S, ZHANG J. Study on Real-Time Unambiguous Estimation of Target Velocity for Stepped-Frequency Linear Frequency-Modulated Pulse Radar[J]. Journal of Hunan University(Natural Science Edition), 2011, 38(5):59-63. (in Chinese)
- [15] 胡亮兵, 刘宏伟, 刘保昌, 等. MIMO 雷达发射方向图匹配和波形优化方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(6):1021-1026.
- HU L B, LIU H W, LIU B C. Transmit Beam Pattern Matching Design and Waveform Optimization for MIMO Radar[J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(6):1021-1026. (in Chinese)
- [16] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
- DING L F, GENG F L. Radar Theory[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
- [17] WANG Y C, WANG X, LIU H W, et al. On the Design of Constant Modulus Probing Signals for MIMO Radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(8): 4432-4438.
- [18] 王敏, 周磊, 周树道, 等. 基于峰值信噪比和小波方向特性的图像奇异值去噪技术[J]. 应用光学, 2013, 34(1): 85-89.
- WANG M, ZHOU L, ZHOU S D, et al. Image SVD Denoising Based on PSNR and Wavelet Directional Feature[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(1): 85-89. (in Chinese)
- (编辑:姚树峰)

(上接第 18 页)

- CHENG Y, ZHOU Z L, WANG K, et al. A Research on Attack-Defense Strategy Optimization Based on Comprehensive Efficiency in the Air Combat[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2016, 17(5): 15-19. (in Chinese)
- [13] GASSE M, AUSSEM A, ELGHAZEL H. A Hybrid Algorithm for Bayesian Network Structure Learning with Application to Multi-Label Learning[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(15):6755-5772.
- [14] STURLAUGSON L, SHEPPARD J W. Uncertain and Negative Evidence in Continuous Time Bayesian Networks[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2015, 70(c):99-122.
- [15] MKRTCHYAN L, PODOFILLNI, DANG V N. Methods for Building Conditional Probability Tables of Bayesian Belief Networks From Limited Judgment; An Evaluation for Human Reliability Application[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2016, 151: 93-112.
- [16] 杨海东, 解凯. 集中式组网雷达假目标干扰建模[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(5):90-95, 105.
- YANG H D, XIE K. Jamming Model of False Targets for Data Processing Algorithm of Centralized Netted Radar[J]. Command Control & Simulation, 2008, 30(5):90-95, 105. (in Chinese)
- [17] SONG W D, ZHAO C W, HUO I J X. Improved Differential Evolution Algorithm for Solving WTA Problem[J]. Energy Procedia, 3rd International Conference on Computer and Automation Engineering, 2011: 1348-1353.
- [18] 范振宇, 王磊, 陈越, 等. 组网雷达航迹欺骗技术研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(2):179-181, 186.
- FAN Z Y, WANG L, CHEN Y, et al. A Technique of Track Deception Against Netted Radars[J]. Journal of CAEIT, 2010, 5(2):179-181, 186. (in Chinese)
- [19] LEE H, HYOCHOONG B. Optimal Phantom Track Generation for Multiple Electronic Combat Air Vehicles[C]//Proc of the International Conference on Control, Automation and System. 2008:29-33.
- [20] OZER S. Increasing Combat Aircraft Survivability through Coherent Self-protection Jammers[D]. Alabama: Air University, 2008.
- [21] MAITHRIPALA D H A, JAYASURIYA S. Radar Deception through Phantom Track Generation[C]//Proc of the American Control Conference. 2005:4102-4106.
- (编辑:徐楠楠)